

# Physik für Betrieb und Konjunktur

Wirtschaftswissenschaftler nutzen nicht nur physikalische Methoden, sondern Physiker befassen sich auch zunehmend mit Fragen der Mikro- und Makroökonomik.

Thomas Brenner

Physikalische Konzepte und Methoden erfreuen sich in den Wirtschaftswissenschaften seit langem einer großen Beliebtheit. Immer wieder diente die Physik als Vorbild für die Entwicklung neuer Theorien in der Ökonomik. In den letzten 10 bis 15 Jahren ist jedoch eine zunehmende Tendenz zu interdisziplinärer Forschung zu erkennen. Dabei werden nicht nur Konzepte aus der Physik oder anderen Wissenschaften in der Ökonomik für die eigene Theoriebildung benutzt, sondern zunehmend arbeiten auch Physiker mit ihren Methoden an wirtschaftswissenschaftlichen Fragestellungen.

Wirtschaftsphysikalische Arbeiten gibt es bereits seit langem. Jedoch hat ihre Zahl in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Dies ist in Deutschland vor allem Arbeitsgruppen wie derjenigen um Wolfgang Weidlich und Werner Ebeling zu verdanken. In den USA hatte das Santa Fe Institut einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklung der Wirtschaftsphysik. Mittlerweile hat sich dafür die Bezeichnung „econophysics“ durchgesetzt. Hier verwenden wir jedoch den deutschen Begriff „Wirtschaftsphysik“, der für wissenschaftliche Arbeiten stehen soll, die von Physikern außerhalb von ökonomischen Forschungsgruppen oder Instituten durchgeführt werden und sich mit ökonomischen Fragestellungen beschäftigen.

Die Vorgehensweisen innerhalb der Wirtschaftsphysik sind dabei ebenso vielfältig wie die behandelten Fragestellungen. Der Bereich innerhalb der Wirtschaftswissenschaften, in dem momentan die Wirtschaftsphysik am aktivsten ist, ist die Finanzmarkttheorie. Ihr ist ein eigener Artikel innerhalb dieses Schwerpunktheftes gewidmet. Über die anderen Bereiche soll dieser Beitrag einen Überblick geben. Dabei werden im Folgenden vier Vorgehensweisen diskutiert und anhand eines Beispiels erläutert:

- ▶ die direkte Verwendung physikalischer Erkenntnisse in der ökonomischen Diskussion (z. B. Bedeutung der Energie im Produktionszyklus),
- ▶ die Nutzung mathematischer Methoden aus der Physik für die Analyse ökonomischer Prozesse (z. B. Konjunkturtheorie),
- ▶ die Übertragung von Konzepten aus der Physik (z. B. Selbstorganisation in der Wirtschaft) und
- ▶ die Verwendung physikalischer Modelle (z. B. evolutionäre Betrachtung von Innovationsprozessen).



Ausgehend von den Entscheidungen einzelner Unternehmen, eher in Expansion oder in Rationalisierung zu investieren, lassen sich Konjunkturzyklen im Rahmen eines dynamischen Systems verstehen. (Foto: Infineon)

## Mit Kapital und Energie

Alle Prozesse, in denen Materie und/oder Energie verändert werden, lassen sich prinzipiell durch physikalische Gesetze beschreiben. Dies gilt somit auch für Produktionsprozesse in der Wirtschaft. Dennoch scheinen die Fragestellungen in Physik und Ökonomik weit auseinander zu liegen. Es gibt deshalb unterschiedliche Auffassungen darüber, ob physikalische Gesetze für die Theoriebildung in der Ökonomik eine Rolle spielen.

In den letzten Jahren mehren sich die Stimmen, die diese Frage bejahen und versuchen, ökonomische Rahmenbedingungen aus physikalischen Gesetzen abzuleiten. Vor allem thermodynamische Gesetze werden immer wieder auf Produktionsprozesse angewandt [1], womit sich Aussagen sehr grundsätzlicher Art gewinnen lassen. Glaubt man an die Relevanz dieser Aussagen für die ökonomische Theoriebildung, so scheint dieser Bereich ein natürliches Forschungsfeld der Wirtschaftsphysik zu sein, weil hier die beiden Disziplinen aufeinander treffen.

Vor allem innerhalb der ökologischen Ökonomik hat die Verwendung von physikalischen Erkenntnissen Beachtung gefunden. Dieser interdisziplinäre Forschungsbereich befasst sich mit den Auswirkungen von Wirtschaftsprozessen auf ihre Umgebung und behandelt Themen wie die Umweltbelastung durch die Industrie und das Problem erschöpfbarer Ressourcen. Dabei spielen biophysikalische Überlegungen eine wichtige Rolle. So werden in diesem Forschungsgebiet immer wieder thermodynamische Gesetze auf ökonomische Fragestellungen angewandt [2]. Viele dieser Arbeiten werden von Wirtschaftswissenschaftlern durchgeführt.

Dr. Dr. Thomas Brenner, Max-Planck-Institut zur Erforschung von Wirtschaftssystemen, Kahlaische Str. 10, 07745 Jena

Ein Beispiel sind die Arbeiten zur Bedeutung der Energie für die wirtschaftliche Entwicklung von Reiner Kümmerl und seinen Koautoren [3]. Aufgrund der historischen Frage, wie Gewinne aus der Produktion zwischen den Besitzern von Land und Kapital und den Arbeitern aufgeteilt werden sollten, werden Land, Arbeit und Kapital traditionell als die einzigen Produktionsfaktoren in der ökonomischen Theorie behandelt. Dies hat sich, abgesehen von der Vernachlässigung des Faktors Land, bis heute nicht wesentlich verändert. Aus einer physikalischen Perspektive hingegen erscheinen Materie und Energie als natürlichere Wahl. Deshalb wurde die Berücksichtigung dieser beiden Faktoren in der Literatur immer wieder vorgeschlagen.

Kümmerl und seine Kollegen haben sich nun zur Aufgabe gemacht, die Relevanz des Produktionsfaktors Energie nachzuweisen. Dazu wird das relative Wachstum der Produktion  $dq/q$  eines Landes in Abhängigkeit vom relativen Wachstum des Kapitaleinsatzes  $dk/k$ , des Arbeitseinsatzes  $dl/l$  und des Energieeinsatzes  $de/e$  formuliert (ein Ansatz, wie er auch in der Ökonomik üblich ist, jedoch ohne Verwendung des Energieeinsatzes):

$$\frac{dq}{q} = \alpha \frac{dk}{k} + \beta \frac{dl}{l} + \gamma \frac{de}{e} . \quad (1)$$

Die Koeffizienten  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  dieser Gleichung werden auf der Basis von empirischen Daten geschätzt. Diese Koeffizienten werden in der Ökonomik üblicherweise als die Wichtigkeit der Produktionsfaktoren interpretiert. Tabelle 1 zeigt die durchschnittlichen Werte für das verarbeitende Gewerbe in drei Ländern.

**Tabelle 1: Koeffizienten für Kapital-, Arbeits- und Energieeinsatz im verarbeitenden Gewerbe**

Land	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	$\bar{\gamma}$
USA	0,36	0,10	0,54
Japan	0,34	0,21	0,45
Deutschland	0,45	0,05	0,50

(aus [3])

Damit lässt sich zeigen, dass die Schwankungen der Produktion im verarbeitenden Gewerbe in starkem Maße mit Schwankungen im Energieeinsatz einhergehen. Die Vermutung liegt nahe, dass Veränderungen im Energieeinsatz dazu genutzt werden, um die Produktion kurzfristig an Nachfrageschwankungen anzupassen. Ein flexibler Energieeinsatz spielt damit eine wichtige Rolle bei der Kontrolle der Produktion, was in der ökonomischen Diskussion oft übersehen wird.

Vor allem die ökologische Ökonomik, in deren Rahmen interdisziplinäre Forschung üblich ist, ist sehr offen gegenüber solchen Überlegungen. Leider hat sich die Wirtschaftsphysik diesem Thema bisher jedoch wenig gewidmet. Die meisten Arbeiten stammen aus wirtschaftswissenschaftlichen und biologischen Instituten. Aufgrund der Offenheit der entsprechenden Wissenschaftler wäre es für Physiker in diesem Bereich leicht, in eine Zusammenarbeit oder Diskussion einzutreten.

### Konjunktur mit Physik

Weit verbreitet ist es in der Wirtschaftsphysik, Methoden zu nutzen, die ursprünglich für die Physik entwickelt wurden. Die immer komplexer werdenden

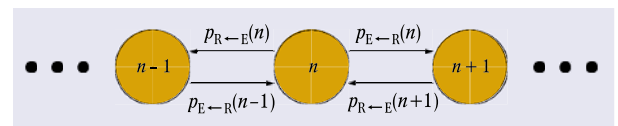
Modelle in der Ökonomik haben nun auch dort das Interesse an Methoden aus der Physik verstärkt, die sich dabei in drei Klassen unterteilen lassen.

► Statistische Methoden und Verteilungen aus der Physik werden vor allem auf die Finanzmarkt-Theorie übertragen. Es gibt aber zahlreiche weitere Arbeiten, die z. B. die Verteilungen von Firmengröße und Firmenwachstum [4], die Verteilung des Einkommens [5] und den Verlauf des Wirtschaftswachstums [6] untersuchen.

► Methoden zur Analyse dynamischer Systeme werden auf eine Vielzahl von Arbeiten innerhalb der Wirtschaftsphysik übertragen. Beispiele sind die Chaostheorie, Methoden zur Behandlung von stochastischen Prozessen, wie die Fokker-Planck- und Mastergleichung, die adiabatische Elimination, oder der „mean-field“-Ansatz. Anwendungsbereiche finden sich in fast allen Gebieten der Ökonomik, vor allem in der Konjunktur-, Spiel-, Markt- und Konsumtheorie. Viele der Arbeiten, die auf dieser Vorgehensweise beruhen, stammen von Wolfgang Weidlich und seiner Arbeitsgruppe (ein Überblick über seine Arbeiten findet sich in [7]). Eine dieser Arbeiten, die Behandlung des Konjunkturphänomens, wird unten genauer vorgestellt.

► Als dritte Methode ist die Simulationen von Multi-Agenten-Systemen zu nennen. Diese werden vor allem in der Wirtschaftsgeographie [8–10] und im Bereich der Marktprozesse [11] eingesetzt. Gleichzeitig hat sich in der Ökonomik eine Gruppierung gebildet, die ebenfalls Multi-Agenten-Systeme simulieren, um wirtschaftliche Fragestellungen zu behandeln (diese Forschungsrichtung nennt sich „Agent-based Computational Economics“).

Es hat sich gezeigt, dass die drei genannten Methodenklassen universell einsetzbar und keinesfalls auf den Bereich der Physik allein beschränkt sind, wobei sie natürlich dort besonders vielfältig eingesetzt werden. Dass die Wirtschaftswissenschaften diese Methoden übernehmen ist deshalb durchaus zu erwarten. Dazu kann die Wirtschaftsphysik einen wesentlichen Beitrag leisten. Momentan konzentriert sich das Interesse der Ökonomen an der Wirtschaftsphysik hauptsächlich auf die Methoden. Es ist jedoch anzunehmen, dass mit der Zeit die ökonomischen Inhalte der wirtschaftsphysikalischen Arbeiten zunehmend in den Vordergrund treten werden.



**Abb. 1:** In einem Modell zur Beschreibung der Konjunkturzyklen hängt der Zustand  $n$  der gesamten Wirtschaft von den Wahrscheinlichkeiten  $p$  ab, dass einzelne Firmen ihre Investitionstätigkeit von Expansion (E) auf Rationalisierung (R) wechseln.

Als Beispiel für die Verwendung von mathematischen Methoden aus der Physik zur Behandlung ökonomischer Fragestellungen soll hier die Arbeit von Wolfgang Weidlich und seinen Mitarbeitern im Bereich der Konjunkturtheorie vorgestellt werden [12, 13]. Diese Arbeit erklärt wie viele andere Arbeiten in der Wirtschaftsphysik ein makroökonomisches Phänomen auf der Basis mikroökonomischer Wechselwirkungen. Ausgangspunkt ist eine explizite Modellierung der Investitionsentscheidung einer jeden Firma. Es stehen zwei Investitionsmöglichkeiten zur Verfügung, expansive

Investitionen und Rationalisierungsinvestitionen. Um das Modell einfach zu halten, werden zwei mögliche Firmenstrategien angenommen: Eine Strategie E, bei der viel Geld für expansive Investitionen ausgegeben wird, d. h. Kapazitäten für die Produktion von höheren Stückzahlen geschaffen werden. Zugleich wird bei dieser Strategie wenig in Rationalisierung investiert, d. h. in Maschinen, die billiger produzieren. Bei der Strategie R ist es umgekehrt. Die Wirtschaft lässt sich dann durch die Zahl der Firmen  $n_E$  und  $n_R$ , die der einen oder anderen Strategie folgen, beschreiben. Bei einer konstanten Gesamtzahl an Firmen von  $2N$  ist der Zustand der Wirtschaft vollständig durch die Variable  $n = (n_E - n_R)/2$  gegeben.

Es wird nun angenommen, dass jede Firma zu jedem Zeitpunkt ihre Strategie mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit wechselt. Für einen Wechsel von Strategie E zu Strategie R wird diese Wahrscheinlichkeit mit  $p_{R \leftarrow E}(n)$  und für den entgegengesetzten Wechsel mit  $p_{E \leftarrow R}(n)$  bezeichnet. Diese Wahrscheinlichkeiten hängen vom aktuellen Zustand der Wirtschaft ab. Sie beschreiben die Dynamik der Wirtschaft, da sich mit jedem Strategiewechsel einer Firma der Zustand der Wirtschaft  $n$  um eins ändert (Abb. 1). Damit wird der Übergang von der individuellen Entscheidung von Firmen auf die Veränderung des Zustandes der Wirtschaft vollzogen.

Die Wechselwahrscheinlichkeiten werden folgendermaßen modelliert:

$$p_{R \leftarrow E}(n) = \nu \cdot \exp[\delta + \kappa x] \quad (2)$$

$$p_{E \leftarrow R}(n) = \nu \cdot \exp[-(\delta + \kappa x)],$$

wobei  $x = n/N$  angibt, ob hauptsächlich expansiv investiert wird ( $x = 1$ ) oder rationalisiert wird ( $x = -1$ ),  $\nu$  ein technischer Parameter für die Geschwindigkeit der Dynamik ist, und  $\kappa$  die Häufigkeit der Strategieimitationen festlegt. Der Trend  $\delta$  gibt an, ob die Firmen künftig generell eher in Expansion oder in Rationalisierung investieren. Das durch diese Gleichungen definierte dynamische System lässt sich durch die Mastergleichung

$$\begin{aligned} \frac{dP(n;t)}{dt} = & (N + n - 1) \cdot p_{E \leftarrow R}(n-1) \cdot P(n-1;t) \\ & + (N - n - 1) \cdot p_{R \leftarrow E}(n+1) \cdot P(n+1;t) \\ & - (N + n) \cdot p_{E \leftarrow R}(n) \cdot P(n;t) \\ & - (N - n) \cdot p_{R \leftarrow E}(n) \cdot P(n;t) \end{aligned} \quad (3)$$

beschreiben. Zusätzlich wird nun eine Abhängigkeit des Trendparameters  $\delta$  vom aktuellen Zustand der Wirtschaft eingeführt;

$$\begin{aligned} \frac{d\delta(t)}{dt} = & \mu \cdot [\delta_0 - \delta(t)] \cdot \exp[-\beta x(t)] \\ & - \mu \cdot [\delta_0 + \delta(t)] \cdot \exp[\beta x(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

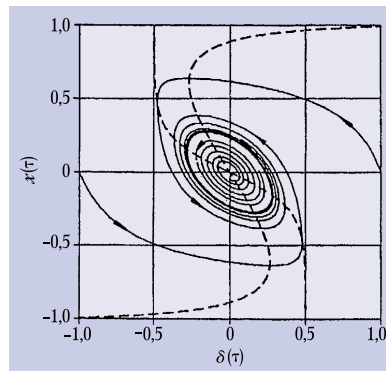
mit den Parametern  $\mu$ ,  $\beta$  und  $\delta_0$ . Der Trendparameter bewegt sich entsprechend dieser Gleichung immer in die entgegengesetzte Richtung des momentanen Wertes  $x(t) - 0,5$ . Wird in der Wirtschaft also überwiegend expansiv investiert, so entsteht ein Trend hin zur Rationalisierung und umgekehrt. Für eine unendlich große Zahl von Firmen, ergibt sich eine deterministische Dynamik, die für bestimmte Parameterwerte ein zyklisches Verhalten zeigt (Abb. 2).

Auf diese Weise wird gezeigt, dass sich aus der Kom-

bination von individuellen Investitionsentscheidungen und einer davon abhängigen generellen Einstellung in der Firmenpopulation ein Konjunkturzyklus ergeben kann. Damit wird das Auftreten der gut belegten kurzen Zyklen in der Wirtschaft auf der Basis psychologischer Prozesse und Stimmungen erklärt. Ebenso lässt sich zeigen, dass eine ähnliche stochastische Modellierung der Wechselwirkung zwischen Investitions- und Konsumentscheidungen die Abhängigkeiten zwischen den Konjunkturzyklen verschiedener Länder erklären kann [13]. Das Konjunkturphänomen ist ein typisches Beispiel für ein ökonomisches Phänomen, bei dem stochastische Prozesse eine entscheidende Rolle spielen und viele Akteure interagieren, sodass sich die mathematischen Methoden aus der statistischen Physik als sehr hilfreich erweisen.

### Metaphern für die Marktdynamik

Bei der Übertragung von Konzepten aus der Physik in die Ökonomik wird davon ausgegangen, dass die Prozesse in den beiden Disziplinen ähnliche Strukturen aufweisen. Beispiele sind die Selbstorganisation, die Pfadabhängigkeit und die Selbstverstärkung (siehe [14, 15] für einen Überblick über die ökonomische Verwendung dieser Konzepte) und die räumlichen Entwicklung auf der Basis von Nachbarschaftswechselwirkungen [8–10]. Dabei handelt es sich, wie gesagt, um die Übertragung von Konzepten und nicht von konkreten physikalischen Modellen.



**Abb. 2:**

Im Rahmen des Modells zeigt die Wirtschaft für bestimmte Parameterwerte (hier die Trajektorien für  $\kappa = 1,6$ ,  $\delta_0 = 0,5$ ,  $\beta = 4$  und  $\mu = 0,5$ ) ein zyklisches Verhalten, d. h. bei überwiegend expansiven Investitionen in der Gegenwart entsteht ein Trend zur Rationalisierung und umgekehrt. (aus [12])

Befruchtend sind dabei die Unterschiede zwischen Wirtschaftswissenschafts- und Physikstudium. Die Arten und Weisen, an Probleme heranzugehen, sind jeweils sehr verschieden. Das fördert den Austausch von Konzepten und ermöglicht es den Physikern die Wirtschaftswissenschaften mit ihren Konzepten und Sichtweisen zu bereichern. Dies gilt vor allem für Aspekte, die in den Wirtschaftswissenschaften in den letzten Jahrzehnten wenig Beachtung fanden, wie die Dynamik, die Zufälligkeit und die räumliche Dimension von Prozessen.

Erneut gibt es jedoch keinen zwingenden Grund, warum diese Konzepte nicht von der Ökonomik übernommen und dann einen Bestandteil von ihr bilden sollten. In der Tat existieren dort schon seit einiger Zeit Arbeiten, die auf Konzepten aus der Physik, wie der Selbstorganisation, der lokalen Wechselwirkung oder der Selbstverstärkung aufbauen. Gleichzeitig ist jedoch durch die Verwendung gemeinsamer Konzepte ein Austausch zwischen der Ökonomik und der Physik in diesem Bereich entstanden.

Dies gilt vor allem für das Konzept der Selbstorganisation (eine Vielzahl von Büchern wie [16–18] belegen dies). Eine wesentliche Rolle beim Zustandekommen

dieses Austauschs spielte das Santa Fe Institut, in dem bewusst Ökonomen, Physiker, Biologen und Wissenschaftler aus anderen Fachbereichen zusammenarbeiten. Aus diesem Institut ist auch die Arbeit von Brian Arthur über allgemeine Allokationsprozesse hervorgegangen [14]. Diese Arbeit beruht auf einer sehr einfachen mathematischen Struktur und wurde in der Zwischenzeit auf viele verschiedene ökonomische Probleme angewandt. Sie soll deshalb hier vorgestellt werden, auch wenn Arthur kein Physiker ist und der Bezug zur Wirtschaftsphysik hauptsächlich in der Verbindung zum Santa Fe Institut besteht.

Eine Anwendung dieser Allokationsprozesse ist die Erklärung des so genannten technologischen „Lock-in“. Dabei handelt es sich um das Phänomen, dass sich am Markt unter Umständen nicht das optimale Produkt durchsetzt. Um dieses Phänomen zu erklären, wird angenommen, dass zwei verschiedene Technologien auf einem Markt miteinander konkurrieren (ein in der Literatur häufig vorgebrachtes Beispiel sind die beiden anfänglich vorhandenen Videosysteme VHS und Beta). Die Konsumenten sollen sich nun nacheinander für eine der beiden Technologien entscheiden. Der Anteil der aktuellen Benutzer der einen Technologie sei  $x_1(n) = x(n)$ , der Anteil der Benutzer der anderen Technologie  $x_2(n) = 1 - x(n)$ , wobei  $n$  die Zahl der Benutzer ist, die sich bisher entschieden haben.

Die Entscheidung jedes neuen Konsumenten ist zwar zufällig, die Wahrscheinlichkeiten  $p_1(x) = p(x)$  und  $p_2(x) = 1 - p(x)$  für die beiden möglichen Entscheidungen hängen aber von den Entscheidungen der bisherigen Benutzer ab. Damit ergibt sich für die Dynamik

$$x(n+1) = x(n) + \frac{1}{n+1} [p(x) - x(n)] + \frac{1}{n+1} \xi(x), \quad (5)$$

wobei  $\xi(x)$  eine zufällige Größe mit den möglichen Werten  $1 - p(x)$  und  $-p(x)$  und einem Mittelwert von 0 ist. Der rechte Teil von Gl. (5) besteht aus einem deterministischen und einem stochastischen Teil.

Zuerst soll der deterministische Teil betrachtet werden. Dieser hängt entscheidend von der Wahrscheinlichkeit  $p(x)$  ab, für die Abbildung 3 eine beispielhafte Abhängigkeit zeigt. Bei vielen Technologien gibt es so genannte Netzwerk-Externalitäten. Darunter versteht man den Effekt, dass eine Technologie für die Verbraucher umso vorteilhafter ist, je mehr andere Konsumenten auch diese Technologie verwenden. Im Falle eines Videosystems leuchtet dies unmittelbar ein, da sich dann mit mehr Leuten Videokassetten austauschen lassen. Ein Käufer wird sich deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit für diejenige Technologie entscheiden, die von der Mehrheit der Konsumenten gewählt wurde (Abb. 3). Es entsteht eine Dynamik, bei der sich eine der beiden Technologien durchsetzt.

Die Selbstorganisation in der Population der Konsumenten führt also zur Koordination auf eine Technologie. Ist eine der beiden Technologien objektiv überlegen (dies wird bei den beiden Videosystemen für das beta-System behauptet), so ändert sich an der Funktion  $p(x)$  in Abb. 3 wenig. Lediglich der Schnittpunkt dieser

Funktion mit der Diagonalen verschiebt sich (also der instabile Zustand). Entscheidet sich in einem solchen Fall die Mehrheit der anfänglichen Konsumenten für die unterlegene Technologie, so setzt sich diese durch und kann mit zunehmender Zahl der Konsumenten immer schwerer durch die überlegene Technologie vom Markt verdrängt werden.

Der stochastische Teil in Gl. (5) zeichnet sich durch eine Abnahme des stochastischen Einflusses mit der Zahl der Konsumenten aus. Daraus folgt, dass der Zufall zu Beginn des Prozesses eine große Rolle spielt, dass diese Rolle aber mit zunehmender Konsumentenzahl abnimmt und schließlich verschwindet. Dies erklärt, warum eine unterlegene Technologie zu Beginn einen großen Marktanteil erlangen und dann später nicht mehr verdrängt werden kann.

## Evolution und Innovation

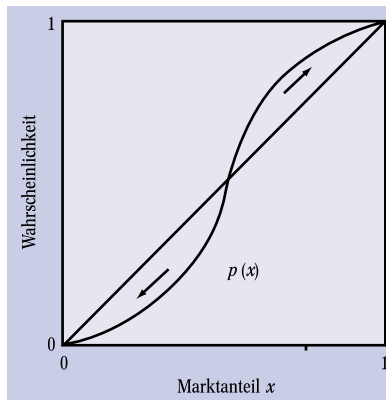
Die letzte Vorgehensweise innerhalb der Wirtschaftsphysik, die hier diskutiert werden soll, ist die Analogiebildung. Dabei werden Modelle aus der Physik in die Ökonomik übertragen. Die physikalischen Variablen und Konstanten werden durch entsprechende ökonomische Größen ersetzt. Die Anwendungsbereiche der Analogiebildung sind sehr unterschiedlich. So gibt es Arbeiten im Bereich der Konsumtheorie und der Innovationsökonomik genauso wie in verschiedenen Bereichen der Makroökonomik [5, 19, 20].

Diese Vorgehensweise wird jedoch innerhalb der Wirtschaftswissenschaften häufig kritisiert. Die Übertragung von Modellen birgt eine große Gefahr in sich, derer sich viele Anwender dieser Vorgehensweise nicht ausreichend bewusst sind. Es ist selten, dass sich Prozesse in verschiedenen Wissenschaften durch exakt die gleichen mathematischen Formulierungen beschreiben lassen, und dass Variablen in der Ökonomik exakt die gleichen Eigenschaften wie physikalische Größen haben. Eine Übertragung von Modellen erfordert aber diese Übereinstimmung. Oft steht in entsprechenden Arbeiten leider nicht die Überprüfung dieser Eigenschaften, sondern der Wunsch, ein physikalisches Modell zu übertragen, im Vordergrund. Dies kann dann innerhalb der Wirtschaftswissenschaften nicht überzeugen, trotz des wissenschaftlichen Potenzials der Analogiebildung.

Als Beispiel für diese Vorgehensweise soll hier die Übertragung eines biophysikalischen Modells von Evolutionsprozessen auf den Innovationsprozess vorgestellt werden [19]. Dieses Beispiel dient auch gleichzeitig dazu aufzuzeigen, wie innerhalb der Wirtschaftsphysik, vor allem durch die Gruppe um

Werner Ebeling, physikalische und biologische Konzepte und Modelle gemeinsam zur Behandlung von ökonomischen Problemen genutzt werden.

Die Übertragung beruht auf der Argumentation, dass jedes ökonomische Produkt durch Variablen charakterisiert werden kann, die seine technologische Basis, seinen Nutzen für den Konsumenten und seinen Preis beschreiben. Diese Variablen spannen den Produktraum aller möglichen Produkte auf. Jedem Punkt  $q$  in diesem Raum wird nun ein „Fitnesswert“  $E(q,t)$  zuge-



**Abb. 3:** Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Wahl zwischen Technologien und die daraus entstehende Dynamik (aus [14])

ordnet. Man erhält auf diese Weise eine Fitnesslandschaft über dem Produktraum (ähnliche Vorstellungen wurden bereits von Kaufmann auf andere ökonomische Fragestellungen angewandt). Der Fitnesswert gibt den Erfolg des entsprechenden Produkts auf dem Markt wieder. Auf diese Weise wird die Variable der biologischen Fitness in die Ökonomik übertragen.

Die Fitness eines Produkts hängt von den anderen auf dem Markt angebotenen Produkte ab. Deshalb ändert sich die Fitnesslandschaft im Laufe der Zeit. Hier soll jedoch nicht die Veränderung der Fitnesslandschaft, sondern die Veränderung der Produkte auf dem Markt untersucht werden. Die Produktpopulation lässt sich durch eine Dichte  $x(q,t)$  im Produktraum darstellen. Die Veränderung dieser Dichte wird nun durch ein biophysikalisches Evolutionsmodell, das von Ebeling und anderen entwickelt wurde, beschrieben:

$$\partial_t x(q,t) = x(q,t)[E(q,t) - \langle E(t) \rangle] + D\delta x(q,t). \quad (6)$$

Dabei ist  $D\delta$  ein Mutationsoperator, der zufällige Veränderungen in der Produktpopulation beschreibt. Es finden somit zwei Prozesse statt.

Zum einen existiert ein adaptiver Prozess, durch den erfolgreiche Produkte auf dem Markt häufiger werden, während erfolglose Produkte vom Markt verschwinden. Zum anderen treten zufällig, in der Regel durch Innovationsprozesse, neue Produkte auf. Dabei sind kleine Veränderungen der Produkteigenschaften häufig, große Veränderungen treten dagegen selten auf. Auf diese Weise wird das biophysikalische Modell ökonomisch interpretiert.

Abbildung 4 zeigt die entstehende Verteilung von Produkten für einen eindimensionalen Produktraum. Diese Verteilung entsteht jedoch nur, wenn die Fitnesslandschaft lange genug konstant bleibt. Das interessante an diesem Ansatz ist, dass er einige Sachverhalte auf anschauliche Weise erklären kann. So erhält man eine alternative Erklärung für die bereits oben diskutierten technologischen Lock-ins. Enthält die Fitnesslandschaft ein sehr hohes isoliertes lokales Maximum, so wird das entsprechende Produkt den Markt dominieren und es kann sehr lange dauern, bis ein noch besseres, aber noch fernliegendes Produkt entdeckt wird und sich am Markt durchsetzt. Ebenso lässt sich erklären, warum es in der technologischen Entwicklung zu Wellen kommt. Jedesmal, wenn ein noch höheres lokales Maximum in der Fitnesslandschaft entdeckt wird, kommt es in der Folge zu einer starken Veränderung in der Produktpopulation. Diese Dynamik nimmt anschließend ab, bis ein neues Maximum entdeckt wird. Damit kommt es zu einem Wechsel zwischen Zeiten mit starken Veränderungen der Produktpopulation und Zeiten mit nahezu konstanten Produkten.

### Schlussbemerkungen

Die bisherige Darstellung der Arbeiten innerhalb der Wirtschaftsphysik zeigt in erster Linie, wie vielfältig dort sowohl die Vorgehensweisen als auch die Anwendungsbereiche sind. In einigen Bereichen ist ein Austausch zwischen Wissenschaftlern aus Physik und Wirtschaftswissenschaften entstanden und neue Methoden

und Konzepte wurden in die Ökonomik eingeführt. Dabei hat sich die Wirtschaftsphysik als sehr fruchtbar für die ökonomische Theorie- und Modellbildung erwiesen.

Es ist zu erwarten, dass die Bedeutung der Wirtschaftsphysik in der Zukunft innerhalb der Ökonomik noch deutlich zunimmt, denn diese weist eine eindeutige Tendenz auf, komplexere Prozesse und Systeme theoretisch zu behandeln. Methoden und Konzepte aus der Physik sind hier nicht nur hilfreich sondern dringend erforderlich. Außerdem zeigt die Geschichte der Ökonomik, dass diese sehr offen gegenüber Anregungen aus der Physik ist.

Der Stellenwert der Wirtschaftsphysik steht damit außer Frage. Dennoch üben viele Arbeiten der Wirtschaftsphysik keinen Einfluss auf die wissenschaftliche Diskussion in der Ökonomik aus. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen werden die Arbeiten oft nicht in denjenigen Zeitschriften veröffentlicht, welche auch innerhalb der wirtschaftswissenschaftlichen Community wahrgenommen werden. Das liegt daran, dass es für

die Wirtschaftsphysiker natürlich aufwändiger ist, ihre Arbeiten in nicht-physikalischen Zeitschriften zu veröffentlichen. Jedoch ist dies der einzige Weg, ein breiteres Publikum auf die eigenen Arbeiten aufmerksam zu machen und damit einen Einfluss auf die ökonomische Diskussion zu haben.

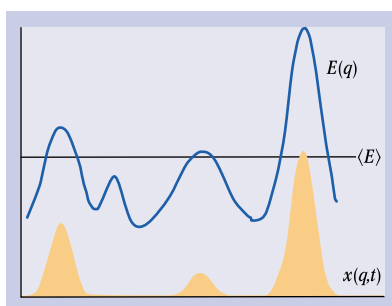
Des Weiteren beschäftigen sich wirtschaftsphysikalische Arbeiten oft mit Fragen, die in den Wirtschaftswissenschaften (noch) keine Rolle spielen. Hier fehlt in der Wirtschaftsphysik oft das Bewusstsein für aktuelle Fragestellungen und Probleme.

Zudem fehlt es der Ökonomik im Gegensatz zur Physik eher an

einem soliden Fundament aus „allgemein gültigen und fortwährenden Wahrheiten“. Wissenschaftliches Arbeiten ist hier sehr stark von der Diskussion geprägt. Das bedeutet gewissermaßen, dass wissenschaftlicher Fortschritt vor allem dadurch erreicht wird, dass viele Wissenschaftler gleichzeitig an einem Thema arbeiten. Dadurch und auf Grund der aktuellen Relevanz bestimmter Themen gibt es zu jedem Zeitpunkt immer Fragen, die bevorzugt behandelt werden. Dies wird von Wirtschaftsphysikern jedoch oft ignoriert.

Schließlich ist es in der Ökonomik aus dem gleichen Grund besonders wichtig, den Bezug der Arbeit zur bisherigen Diskussion darzustellen. Dies erfordert natürlich eine gründliche Kenntnis des Diskussionstandes und damit ein Verständnis ökonomischer Denkweisen, Traditionen und Perspektiven. Hierbei ist eine Kooperation zwischen Physikern und Wirtschaftswissenschaftlern oft hilfreich. Eine Alternative wäre eine parallele Ausbildung in beiden Wissenschaften, die jedoch momentan kaum als Studiengang angeboten wird und damit in den meisten Fällen schwierig zu erlangen ist.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Wirtschaftsphysik einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis ökonomischer Prozesse leisten kann, dass ihr Potenzial aufgrund der fehlenden intensiven Interaktion mit der Ökonomik jedoch noch längst nicht ausgeschöpft ist.



**Abb. 4:** Mit einem aus der Biophysik entlehnten evolutionären Modell lässt sich beschreiben, wie sich Produkte auf dem Markt durchsetzen oder von ihm verschwinden. Unten ist die Produktpopulation und oben die zugeordnete Fitnesslandschaft zu sehen. (aus [19])

## Literatur

- [1] S. Baumgärtner et al., *Ecological Economics* **36**, 365 (2001)
- [2] F. Söllner, *Ecological Economics* **22**, 175 (1997)
- [3] R. Kümmel, D. Lindenberg und W. Eichhorn, *Phys. Bl.*, Mai 1997, S. 869
- [4] M. H. R. Stanley, S. V. Buldyrev, S. Havlin, R. N. Mantegna, M. A. Salinger und H. E. Stanley, *Economic Letters* **49**, 453 (1995)
- [5] J. Mimkes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **60**, 1055 (2000)
- [6] H. G. Danielmeyer, *European Review* **5**, 371 (1997)
- [7] W. Weidlich, *Sociodynamics: A Systematic Approach to Mathematical Modelling in the Social Sciences*, Gordon & Breach, New York (2000)
- [8] P. M. Allen, *Cities and Regions as Self-Organizing Systems*, Models of Complexity, Gordon and Breach, Amsterdam (1997)
- [9] W. Weidlich, in F. Schweitzer (Hrsg.), *Self-Organization of Complex Structures – From Individual to Collective Dynamics*, Gordon and Breach, Amsterdam (1997) S. 475
- [10] F. Schweitzer, in F. Schweitzer und G. Silberberg (Hrsg.), *Selbstorganisation – Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*, Band 9: Evolution und Selbstorganisation in der Ökonomie, Duncker und Humblot, Berlin (1998), S. 97
- [11] K. Nagel et al., *Physica A* **287**, 546 (2000)
- [12] G. Haag, W. Weidlich und G. Mensch, in D. Batten, J. Casti und B. Johansson (Hrsg.), *Economic Evolution and Structural Adjustment*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, Berlin (1987)
- [13] T. Brenner, W. Weidlich und U. Witt, *Metroeconomica* **53**, 113 (2002)
- [14] W. B. Arthur, *Self-Reinforcing Mechanisms in Economics*, P. W. Anderson, K. J. Arrow und D. Pines (Hrsg.), *The Economy as an Evolving Complex System*, Addison-Wesley, Reading, S. 9 (1988)
- [15] A. Kirman, in F. Schweitzer und G. Silberberg (Hrsg.), *Selbstorganisation – Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*, Band 9: Evolution und Selbstorganisation in der Ökonomie, Duncker und Humblot, Berlin (1998), S. 13
- [16] P. W. Anderson, K. J. Arrow und D. Pines, *The Economy as an Evolving Complex System*, Addison-Wesley, Reading (1988)
- [17] F. Schweitzer, *Self-Organization of Complex Structures – From Individual to Collective Dynamics*, Gordon and Breach, Amsterdam (1997)
- [18] W. B. Arthur, S. N. Durlauf und D. A. Lane, *The Economy as an Evolving Complex System II*, Addison-Wesley, Reading (1997)
- [19] W. Ebeling, V. P. J. Karmeshu und A. Scharnhorst, *Advances in Complex Systems* **4**, 71 (2001)
- [20] H. Föllmer, *Journal of Mathematical Economics* **1**, 51 (1974)

## Der Autor

**Thomas Brenner**, Jahrgang 1968, studierte Physik in Stuttgart. Schwerpunkte seiner Diplom- und Doktorarbeit (1995) am dortigen 2. Institut für Theoretische Physik lagen in der Anwendung physikalischer Methoden zur Untersuchung von Konsumentenverhalten und Konjunkturzyklen. Nach einem kurzen Aufenthalt an der Universität in Freiburg hat Brenner Ende 1995 seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI zur Erforschung von Wirtschaftssystem in Jena aufgenommen. An der Friedrich-Schiller-Universität in Jena hat er 1998 eine zweite Doktorarbeit in den Wirtschaftswissenschaften und 2003 die Habilitation in der Volkswirtschaftslehre abgeschlossen. Am MPI beschäftigt er sich vor allem mit der Modellierung und empirischen Untersuchung von Lernprozessen in der Ökonomie und mit der Analyse der Entstehung und Veränderung der räumlichen Verteilung von Firmen. Seit dem Sommersemester 2003 ist Brenner Privatdozent an der Universität in Jena.

